

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLTIO – AMPERICAS Y
PECULIARIDADES DE FUNCIONAMIENTO DE UN VAPORIZADOR DE ARCO
EN VACIO**

CARLOS JAVIER JAIMES OCHOA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN FÍSICA
BUCARAMANGA
2013**

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLTIO – AMPERICAS Y
PECULIARIDADES DE FUNCIONAMIENTO DE UN VAPORIZADOR DE ARCO
EN VACIO**

CARLOS JAVIER JAIMES OCHOA

**Proyecto de grado para optar al título de
MAGISTER EN FÍSICA**

Director

VALERIY DUGAR-ZHABON

Ph.D en física del Plasma

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA

MAESTRÍA EN FÍSICA

BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

A mi santa madre, por todo su apoyo.

Al doctor Valeriy Dougar-Zhabon, por permitirme ser uno de sus últimos estudiantes, por sus consejos y paciencia. Uno de los verdaderos científicos que se encuentran en la vida y modelo a imitar.

Al doctor Priot Tsygankov, “Pedro”, por sus aportes de gran valor en la parte experimental.

A mis compañeros de laboratorio, Dannier, Fredy, Eduardo, Henrillo, Jorge Pabón, a cada uno de ellos por sus palabras de apoyo. Gracias.

Al compañero Camilo por su voz de aliento en los momentos de decaimiento. Ahora sí, se inicia la etapa Char-Buskoskiana.

A mis amigos de juerga, el “brujo” y su corte, Alejo, Chivas, Kike.

A mi hermana Elizabeth y a mi bello sobrino Santiago.

Mis compañeros de trabajo de la UPB, a los profes: Fernando Durán, Uriel Mora, Luis Carlos, José Luis.

A todos gracias por su colaboración en todo momento y sus constantes palabras de apoyo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PROCESOS FÍSICOS EN EL CÁTODO.....	14
2. MECANISMO ECTON	16
3. ETAPAS DE LA FORMACIÓN DE LA MANCHA CATÓDICA	19
4. ESTRUCTURA DE MANCHAS CATÓDICAS.....	22
5. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN	23
5.1 DEPOSICIÓN QUÍMICA EN FASE DE VAPOR (CVD)	23
5.2 DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR (PVD)	24
6. CARACTERÍSTICAS DEL EVAPORADOR DE ARCO.....	25
7. RESULTADOS EXPERIMENTALES	28
8. ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL VAPORIZADOR DE VACIO	35
8.1 FUNCIONAMIENTO SIN CONTROL MAGNÉTICO	35
8.2 PROCESO DE FORMACIÓN DE PELÍCULA DE NITRURO DE TITANIO.....	38
CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA.....	41

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. (A) fuente de energía y panel de control del equipo de arco, (B) sistema magnético y de enfriamiento del evaporizador, (C) cátodo (especies metálicas) en su estado inicial, (D) cátodo después de funcionamiento de la descarga durante 100 horas.....	25
Figura 2: Esquema principal del evaporizado de arco	27
Figura 3. Trayectorias de movimiento de manchas brillantes para intervalos de 20 ms.....	29
Figura 4. Trayectorias de movimiento de manchas brillantes	30
Figura 5. Oscilogramas de corriente de arco (arriba A) y del voltaje (abajo B).....	31
Figura 6. Velocidad de crecimiento de la capa TiN en dependencia de la presión de nitrógeno	33
Figura 7. Microdureza del acero SAE 1020 con películas de nitruro de titanio de una grosor de 2 μ obtenidos bajo la presión de nitrógeno de 0.4-1.0 Pa.....	34
Figura 8. Tasa de crecimiento de la película de titanio a lo largo del radio de la cámara para diferentes corrientes de descarga.....	36
Fig. 9 Tasa de crecimiento de película de Ti en caso de campo magnético	37
Figura 10. Distribución de grosor de la película de nitruro de titanio	38

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de vaporización en ausencia de campo magnético	36
Tabla 2. Parámetros de vaporización en presencia de campo magnético	37

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS VOLTIO – AMPERICAS Y PECULIARIDADES DE FUNCIONAMIENTO DE UN VAPORIZADOR DE ARCO EN VACIO*

AUTOR: JAIMES OCHOA, Carlos Javier**

PALABRAS CLAVE: Vaporizador de arco; Mancha brillante de arco; Deposición de TiN; Microdureza.

DESCRIPCIÓN:

Hoy en día, en la ciencia de materiales, con la ayuda de métodos tradicionales de protección de metales, se busca implementar técnicas alternativas y diseñar nuevos equipos de tecnología avanzada para el tratamiento de materiales. Una de estas alternativas es el tratamiento de metales por iones de descargas eléctricas. En el Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Industrial de Santander por medio del proyecto MOSMET se desarrolla una nueva técnica del tratamiento físico para la modificación de superficies en sólidos, que consiste en el tratamiento simultáneo de la superficie por flujos producidos por la descarga de arco eléctrico y la descarga de alto voltaje a bajas presiones.

Esta tecnología está basada en el reactor llamado MOSMET (Modificación Superficial de Metales) que es el equipo JUPITER modificado para tener posibilidad de hacer deposición e implantación no sólo de materiales gaseosos, sino también de vapores metálicos y sistemas tipo TiN, TiB, TiAl.

Además se estudia un vaporizador de arco con el cátodo de titanio y se muestra que a pesar de que el vaporizador se alimenta por un voltaje constante la descarga de arco se enciende en un régimen de cortos pulsos de corriente que se relaciona con formación de grupos de manchas brillantes calentadas en la superficie catódica. La rapidez de deposición de titanio se encuentra en un rango de 2-10 nm/sec en dependencia de la corriente de arco. Se muestra que las películas TiN sobre las muestras de acero SAE 1020 aumenta significativamente la dureza superficial del acero. Fue encontrado que la dureza de películas de nitruro de titanio depende es una función de la presión del gas de nitrógeno y la dureza máxima se garantiza para las película TiN producidos bajo una presión de nitrógeno de 0.6 Pa.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Ph.D Valeriy Dugar-Zhabon.

ABSTRACT

TITLE: STUDY AMERICAS VOLT CHARACTERISTICS OPERATING AND SPECIAL FEATURES OF A DRY STEAMER ARC*

AUTHOR: JAIMES OCHOA, Carlos Javier**

KEYWORDS: Arc sprayer; Arc spot; TiN deposition; Micro hardness

DESCRIPTION:

Today, in materials science, with the help of traditional methods of metal protection, seeks to implement alternative techniques and design new advanced technology equipment for treating materials. One such alternative is the treatment of metals by ion shock. In the Plasma Physics Laboratory of the Universidad Industrial de Santander through MOSMET project develops a new physical treatment technique for modifying solid surfaces, which involves the simultaneous treatment of the surface fluxes produced by the discharge of electric arc and the high voltage discharge at low pressures.

This technology is based on the reactor called MOSMET (Surface Modification of Metals) JUPITER equipment is modified to have possibility of deposition and implantation of gaseous materials not only, but also metal fume type systems TiN, TiB, TiAl.

Besides studying an arc spray of titanium and the cathode is shown that although the vaporizer is operated at a constant voltage arc discharge is ignited in a short pulse regime that relates current group formation bright spots on the cathode surface heated. The speed of deposition of titanium is in a range of 2-10 nm / sec depending on the arc current. Shows that the TiN film on the samples of SAE 1020 steel significantly increases the surface hardness of steel. Was found that the hardness of titanium nitride films is a function dependent on the pressure of nitrogen gas and ensures maximum toughness for TiN film produced under a nitrogen pressure of 0.6 Pa.

* Graduation Project

** Faculty of Sciences. School of Physics. Director: Ph.D Valeriy Dugar-Zhabon.

INTRODUCCIÓN

La historia del desarrollo de equipos industriales tecnológicos basados en vaporizadores de arco al vacío son utilizados ampliamente para la fabricación de recubrimientos protectores, principalmente sobre superficies metálicas, debido a su excepcional productividad y simplicidad en mantenimiento¹.

El arco en vacío es una descarga producida en vapores de metales entre dos electrodos, situados en un ambiente vacío, que se caracteriza por las siguientes propiedades: bajo voltaje de operación y alta densidad de corriente en la superficie del cátodo, donde la vaporización del material del cátodo se debe a la gran densidad de corriente en puntos en donde se inicia la descarga de arco.

Una descarga en el vacío se enciende, si la densidad del vapor metálico alcanza un cierto valor, que se llama valor umbral. Entonces un medio conductor se mantiene por la propia descarga en forma de un plasma altamente ionizado, haciendo que el material del electrodo sea vaporizado. El proceso de formación de la descarga ocupa pocos microsegundos y tiene lugar en varios puntos localizados en el cátodo, conocidos como mancha catódica (cathode spot)². La alta luminosidad en la mancha catódica, que en la literatura es conocida con el nombre de punto brillante, la cual es un aspecto importante en el estudio de las descargas de arco de alto vacío.

Los procesos catódicos se caracterizan por propiedades sorprendentes o extrañas que son objeto aun de investigación. Como por ejemplo, los puntos brillantes en el cátodo que aparecen y desaparecen al azar ya que se puede controlar su

¹ ANDERS A. A., Brief Modern History of Cathodic Arc Coating en 50 Years of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters, chapter 16, ed. by Donald M. Mattox and Vivienne Harwood Mattox, Society of Vacuum Coaters, 2007, pp. 461.

² KESAEV I. G. Cathode Processes in Electric Arcs. Moscow, 1968: Nauka.

movimiento mediante un campo magnético a partir de la fuerza de Lorentz ($\vec{J} \times \vec{B}$).

El plasma de arco se genera como una serie de descargas puntuales conocidas bajo nombre de “manchas brillantes” que se expande rápidamente en el vacío o en un ambiente gaseoso. La corriente en el ánodo es igual a la corriente catódica, pero el área ocupada en el ánodo por la corriente es mucho mayor, debido a que la densidad es menor que la densidad en el cátodo, especialmente cuando la distancia cátodo-ánodo es de decenas de centímetros y el ánodo es un cuerpo voluminoso. Esta situación resulta, debido a que el material del ánodo prácticamente no se vaporiza. La estructura y la dinámica de las manchas catódicas son aun objeto de estudio y discusión.

La densidad de corriente juega un papel central en muchos modelos porque determina la distribución de densidad de energía y el balance de energía que a su vez gobierna todos los procesos de emisión de electrones, la fase de transición y producción del plasma. Durante los últimos años se han publicado varios trabajos donde se tratan de explicar los fenómenos de la descarga de arco en vacío con el cátodo integralmente frío (integralmente frío significa que solo una pequeña área de la mancha se calienta quedándose frío el cátodo en su totalidad). El movimiento de la mancha brillante catódica y los mecanismos que provocan este movimiento se estudian en^{3,4}.

El problema de formación de la mancha catódica y la vaporización del material del cátodo tiene un gran interés en la práctica actual, como por ejemplo para el mejoramiento de equipos tecnológicos basados en sistemas de vaporización por arco [4-8]; así como para la caracterización de películas con recubrimiento de Ti,

³ HANTZSCHE E., Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance. IEEE Trans. On Plasma Sci., 31 (2003), p. 799.

⁴ JUTTNER B. Cathode spots of electric arcs, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) p.103.

TiN, entre otras, que son formadas con el arco vacío bajo un alto voltaje, por tal motivo el análisis de los fenómenos anteriormente mencionados son el objeto de estudio en el presente trabajo.

1. PROCESOS FÍSICOS EN EL CÁTODO

Los procesos catódicos, que son la parte fundamental de la producción del plasma de arco se caracterizan por las siguientes propiedades⁵:

- 1) Bajo voltaje de operación (del orden del potencial de ionización del material del cátodo).
- 2) Alta densidad de corriente en la superficie del cátodo.
- 3) Alta densidad de plasma (del orden de 10^{20} cm^{-3}) en la zona cerca al cátodo.
- 4) La existencia de un umbral de corriente de operación.

Para entender y apreciar cómo funciona el arco catódico es necesario tener en cuenta que los procesos acaecidos en la superficie catódica pueden ser individuales o colectivos. La distinción entre procesos individuales y colectivos nos ayuda a definir la descarga de arco. En descargas tipo incandescente, los iones se mueven desde el volumen del plasma y son acelerados hasta la superficie del cátodo produciendo una emisión de electrones secundarios. Si estos electrones no ganan suficiente energía para la ionización de los átomos en el espacio gaseoso, la descarga no se desarrolla. En el arco, por el contrario, los electrones se liberan del cátodo no por el impacto de iones individuales, sino por el mecanismo colectivo que es la termo-ionización, ya que en el cátodo aparecen puntos de manchas brillantes que están a una temperatura muy alta (debido al calentamiento de Ohm), o por un fuerte campo eléctrico en agudos picos de microestructura superficial de metales. En algunas situaciones el cátodo se encuentra a temperaturas muy altas y se somete a un fuerte campo eléctrico cuyo resultado será una amplificación no lineal del flujo de termoiónes. La termo-emisión en un campo de alta tensión, que puede ser tratado como un proceso que esta fuera del

⁵ Nouvelles Tendances en Procédés Magnétron et Arc pour le Dépôt de Couches Minces” A joint workshop of the Belgian and French Vacuum Society Gent, Belgium, November 24-25, (2003) Cathodic Arcs André Anders.

control térmico, es decir, la emisión se relaciona con la disipación de la energía de la corriente en los picos de la mancha que se acompaña por la destrucción y erosión de estos picos⁶. En la micro-área donde sucede este proceso, el material se evapora por medio de pequeñas explosiones, conduciendo a otra nueva forma de emisión de electrones. La emisión es un proceso no estacionario, porque la localización de la emisión es cambiada por las explosiones. Esta forma de emisión no estacionaria es llamada emisión explosiva de electrones o ECTON⁷. El ECTON es una fase generalmente muy corta en comparación con el tiempo total del ciclo o el tiempo de vida de la mancha.

Ninguno de los mecanismos tradicionales que tratan explicar propiedades de la emisión catódica de electrones (emisión termoiónica, emisión por el campo, efecto Schottky que posibilita la emisión termoiónica) no puede ser tratado como principal responsable de la emisión explosiva de electrones⁸.

Los electrones son emitidos por la presencia de un proceso de auto-organización del sistema simétrico de la mancha en presencia de una alta temperatura y una alta tensión del campo eléctrico. Las manchas brillantes tienen que cumplir la función de los centros de emisión de electrones y proporcionar las condiciones para la operación de arco auto-sostenido a través de la generación del plasma. Numerosos experimentos sugieren que las propiedades de un arco en vacío están determinadas por estos procesos que ocurren en una región muy pequeña del cátodo, que lleva una corriente entre el cátodo y el ánodo.

⁶ JUTTNER B. Cathode spots of electric arcs, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) p.103.

⁷ HANTZSCHE E., Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance. IEEE Trans. On Plasma Sci., 31 (2003), p. 799.

⁸ MESYATS G.A. Properties of ectons in a vacuum discharge. Proc. XVI Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Moscow-St. Petersburg), 1994, ed. by G A Mesyats (Washington, DC: SPIE), p. 9–25.

2. MECANISMO ECTON

La etapa central en el desarrollo de centros de emisión es la etapa (ii), la etapa explosiva. La idea de la emisión de electrones explosiva fue desarrollado por Mesyats y compañeros de trabajo, incluyendo Bugaev, Litvinov, y Proskurovsky⁹. El término "emisión de electrones explosiva", a veces con el acrónimo EEE", puede referirse al ciclo de desarrollo de un centro de explosivo, o específicamente a la etapa explosiva

Ya en sus primeros trabajos en la década de 1960, Mesyats reconoció la similitud entre las transiciones de fase del plasma y la explosión de los arcos catódicos. Con base en los datos experimentales, Mesyats introdujo un modelo específico de emisión explosiva de electrones en la década de 1990, el modelo "Ecton", que se basa en la explosión de un cono de metal líquido formado por la acción de un campo eléctrico fuerte en la superficie del cátodo caliente. El término "Ecton" se refiere a un "Centro de Explosión" con la terminación "ton" tonelada en analogía con otras partículas o cuasi-partículas (como fotones, protones, etc.) Al hacerlo, Mesyats ha querido resaltar el aspecto discreto, de cada evento explosivo.

De acuerdo con el modelo Ecton, cada Ecton libera aproximadamente 10^{11} electrones en una explosión con una duración del orden de 10 ns. La micro explosión también produce plasma del material catódico y genera las condiciones para la inicio del Ecton siguiente.

Las características como (velocidades supersónicas de iones, los múltiples estados de carga, etc.) diferencian el plasmas de arco catódico, de otros plasmas,

⁹ HANTZSCHE E., Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance. IEEE Trans. On Plasma Sci., 31 (2003), p. 799

y son la razón, para que la deposición catódica de arco de plasma sea un proceso de condensación energética, que conduce a películas que son más densas que la mayoría de otros procesos.

Un volumen microscópicamente pequeño, bajo una capa de óxido, pueden explotar si la tasa de entrada de energía específica, dw / dt , es mucho mayor que la tasa máxima de eliminación de calor; Esto último se puede expresar como la energía de sublimación o de energía de cohesión, E_c , dividido por el tiempo característico de extracción de energía, t , [54], por lo tanto, la condición para la explosión es:

$\frac{dw}{dt} \gg \frac{E_c}{\tau}$. La energía de cohesión puede expresarse como energía por unidad de masa (J / kg) o de partículas por (eV / partículas), y el tiempo característico de extracción de energía se puede determinar por $\tau = d/v_s$, donde d es la característica (lineal) de tamaño del micro volumen y v_s es la velocidad del sonido en el cátodo.

Las fases de transición entre las explosiones, se pueden idealizar como un segmento de alambre, el cual es un micro portador de corriente en la superficie del cátodo. Este segmento de alambre va a explotar con un tiempo de retardo, t_d , produciendo una inestabilidad térmica.

De acuerdo con el modelo ECTON la inestabilidad térmica se produce en pequeñas zonas del cátodo hasta que explota con un tiempo de retardo asociado con la acción específica (\bar{h}) del material. El funcionamiento del arco catódico incluye la producción de plasma y la emisión de electrones a través de una secuencia rápida de micro explosiones.

Queda establecido que las explosiones microscópicas en el cátodo llamadas emisión explosiva de electrones (EEE) juega un rol fundamental en la descarga de

arco en vacío [7]. Fue mostrado que la emisión de explosión presenta un comportamiento cíclico: aparece y desaparece y de nuevo vuelve a aparecer, así sucesivamente. El comportamiento cíclico es explicado como una característica del metal que está bajo un rápido aumento de la temperatura y consiste en la explosión de micro volúmenes metálicos que se acompaña por la emisión de electrones.

Las micro-explosiones cambian la topográfica de la superficie y rápidamente calienta la zona inferior de la mancha. Además se cambia localmente la conductividad y el área de la mancha puede ser incrementada con el tiempo debido a la termo-conductividad que hace de este, un fenómeno inherentemente dependiente del tiempo. El aumento en el área implica una reducción en la densidad de corriente y en la densidad de energía. La cantidad de material catódico transferido a través de la fase explosiva ocurre en tiempos muy cortos, durante los cuales el fuerte campo eléctrico y la densidad de energía disminuyen, reduciendo la emisión de electrones y la temperatura pico también; y por lo tanto la emisión de electrones cesa gradualmente. La actividad en la mancha se observa durante un lapso del tiempo del orden de nanosegundos desde fase explosiva hasta una lenta fase de evaporación¹⁰. La mancha desaparece por completo, hasta el momento de la formación de una nueva micro explosión, que aparece como un movimiento microscópico de la mancha del arco catódico. Debido a la alta densidad de energía, el plasma que se forma en la fase explosiva es altamente ionizado, que puede tener en su composición multiplicidad de iones cargados.

¹⁰ MESYATS G.A. Properties of ectons in a vacuum discharge. Proc. XVI Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Moscow-St. Petersburg), 1994, ed. by G A Mesyats (Washington, DC: SPIE), p. 9–25.

3. ETAPAS DE LA FORMACIÓN DE LA MANCHA CATÓDICA

La generación de la mancha catódica o emisión de centro, como se comentó anteriormente está localizada en la superficie del cátodo, donde está presente la generación de plasma. El estado de material en la mancha pasa por 4 fases: *sólido* → *líquido* → *vapor* → *plasma* y se desarrolla en 4 etapas: (i) etapa de pre-explosión, (ii) etapa de explosión, (iii) etapa intermedia de post-explosión (en esta parte se ha iniciado el enfriamiento, pero la emisión de electrones y la evaporación aun es grande), (iv) etapa final donde sucede el enfriamiento^{11, 12}.

Cada una de las cuatro etapas es altamente dinámica. Al inicio de la etapa de pre-explosión la superficie del cátodo está en condiciones para la exposición que da el inicio a la descarga de arco. El plasma se genera a cierta distancia del cátodo causando flujos de electrones, átomos y radiación¹³. Además la temperatura del sólido, se incrementa debido al calor producido por la resistencia a la corriente y al bombardeo de iones. Cada mancha tiene su propia característica como por ejemplo su función de trabajo local, ya que las condiciones son diferentes en los bordes y en el centro de la mancha catódica, así como la no homogeneidad local de la superficie. Ciertas condiciones son favorables para la emisión de electrones térmicos en presencia de un campo eléctrico se inicia la etapa (ii) que se caracteriza por la emisión explosiva de electrones. Esta etapa es el corazón del modelo ECTON^{14, 15}. Las micro-explosiones producen destrucción (erosión) del

¹¹ MESYATS G.A. Properties of ectons in a vacuum discharge. Proc. XVI Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Moscow-St. Petersburg), 1994, ed. by G A Mesyats (Washington, DC: SPIE), p. 9–25.

¹² G. A. MESYATS "The role of fast processes in vacuum breakdown," in Proc.10th Int. Conf. on Phenomena in Ionized gases, Oxford, U.K, 1971.

¹³ MESYATS G.A. Op. cit.

¹⁴ MESYATS, G.A. and PROSKUROVSKY, D.I., Pulsed Electrical Discharge in Vacuum. Springer-Verlag, Berlin, (1989). Mesyats, G.A., Explosive Electron Emission. URO Press, Ekaterinburg, 1998.

¹⁵ MESYATS, G.A., Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Nauka, Moscow, Russia, (2000).

material catódico en forma de micro hoyos, con el transcurso del tiempo se convierte en micro cráteres pegados en la superficie del cátodo, de tal manera aparece una región desgastada cuyo perfil depende de campo magnético y el valor de la corriente de arco. En el presente existen varios modelos teóricos acerca de la mancha catódica, pero la mayoría está de acuerdo que las micro-explosiones repetitivas son reales y son bien apoyadas por evidencias experimentales. El principal desacuerdo refiere a la duración y la importancia relativa de las etapas de la explosión y post-explosión. Generalmente cada micro-explosión está seguida inmediatamente por la micro-explosión siguiente, y por lo tanto la operación de la descarga se basa en una secuencia rápida de micro-explosiones, cada uno en una escala de tiempo del orden de 10^{-8} s¹⁶. La tercera etapa es medianamente importante. Otro punto de vista considera la etapa explosiva¹⁷ (iii) como una etapa corta y transitoria, casi en estado estable, después de la explosión en la que se emiten electrones desde la capa caliente de metal líquido ubicado en el cráter recién creado. Desde este punto de vista, el material del cátodo se evapora y se ioniza muy cerca de la superficie debido a la intensidad del haz de electrones formado en la capa de caída catódica delgada. Los electrones en el haz tienen una energía correspondiente a la caída catódica (en un rango de 20-50V) y su densidad de corriente está determinada por el aumento del campo y la emisión termoiónica. En la cuarta etapa, deja de existir una emisión de electrones y la evaporación del material ya que la conducción térmica en el cátodo ha cesado, por lo tanto la temperatura de la superficie del cátodo disminuye¹⁸. A pesar de esa baja temperatura en la superficie del cátodo y menor intensidad de campo, esta etapa puede ser importante para la erosión catódica general; la

¹⁶ MESYATS G.A. Properties of ectons in a vacuum discharge. Proc. XVI Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Moscow-St. Petersburg), 1994, ed. by G A Mesyats (Washington, DC: SPIE), p. 9–25.

¹⁷ BEILIS, I.I., “Theoretical modeling of cathode spot phenomena,” in Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Boxman, R.L., Martin, P.J., and Sanders, D.M.,(Eds.). pp. 208–256, Noyes, Park Ridge, New Jersey, 1995.

¹⁸ *Ibid.*

superficie todavía puede emitir vapor metálico, especialmente cuando el material catódico está sometido a alta presión¹⁹.

De acuerdo al modelo ECTON, en una microexplosión se produce plasma del material catódico y se originan condiciones para una nueva micro explosión en la cual en promedio se libera 10^{11} electrones durante de un lapso de tiempo del orden de los 10 ns y la densidad de corriente tiene valor del orden de $j = 10^9\text{ A/cm}^2$ ²⁰.

¹⁹ BEILIS, I.I., "Theoretical modeling of cathode spot phenomena," in Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Boxman, R.L., Martin, P.J., and Sanders, D.M.,(Eds.). pp. 208–256, Noyes, Park Ridge, New Jersey, 1995.

²⁰ MESYATS, G.A., Ecton or electron avalanche from metal, Sov. Phys. Usp. 38, 567–590, 1995.

4. ESTRUCTURA DE MANCHAS CATÓDICAS

Una importante propiedad de la mancha catódica está en su estructura intrínseca ya que muestra la existencia individual de pequeñas partes de fragmentos en la mancha. La estructura de la mancha catódica fue detectada por Kesaev²¹. Quien investigó las huellas dejadas por el arco en películas delgadas ubicados sobre del cátodo. De acuerdo a estos datos, cada fragmento de mancha catódica tiene una corriente dos veces la corriente umbral del arco. La corriente umbral de una descarga de arco es una corriente mínima en la cual la descarga se encuentra autosostenida. La magnitud de esta corriente es de unos pocos amperios hasta varios centenares de amperios, dependiendo del material del cátodo²². La existencia de fragmentos muestra la presencia de microcráteres en cada punto de residencia en la mancha catódica. Estos microcráteres son del orden de micras o fracciones de micras, que aparecen y desaparecen como resultado de la operación de estos fragmentos de la mancha catódica. Estos microcráteres están divididos en dos tipos. El primer tipo corresponde a cráteres que están separados a una gran distancia debido a la evaporación de impurezas no metálica en la superficie del cátodo. Los microcráteres del segundo tipo se caracterizan por la superposición entre ellos.

²¹ I.G KEASEV, Cathode Processes of Electric Arcs. Moscow, U.S.S.R.

²² *Ibíd.*

5. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN

Hay numerosas técnicas que se emplean para depositar recubrimientos duros, resistentes al desgaste y para mejorar propiedades tribológicas de sustratos. En general, los procesos de deposición se pueden dividir en dos tipos: (i) aquellos que involucran transferencia de gotas como pulverización por plasma, pulverización por arco, pulverización por filamento, y (ii) aquellos que involucran transferencia de átomos por átomos como en los procesos de deposición física.

5.1 DEPOSICIÓN QUÍMICA EN FASE DE VAPOR (CVD)

La deposición química en la fase de vapor (CVD) es un proceso por medio del cual un material sólido es depositado por reacciones químicas que se presenta sobre o en las vecindades de la superficie de un sustrato caliente. El calentamiento provoca reacciones químicas en el recubrimiento. Variando las condiciones experimentales (material del sustrato, temperatura del sustrato, composición de la mezcla de gases de reacción, presión total del flujo de gas, etc.) se puede crear películas superficiales con diferentes propiedades. Un rasgo característico de la técnica CVD es capacidad de producir recubrimientos de espesores uniformes y de baja porosidad. Otra propiedad es la posibilidad de deposición localizada o selectiva sobre el sustrato²³. Esta técnica se ha extendido rápidamente a muchas aplicaciones.

²³ C.J. TAVARES, L. REBOUTA, M. ANDRITSCHKY, S. RAMOS. *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93.

5.2 DEPOSICIÓN FÍSICA EN FASE DE VAPOR (PVD)

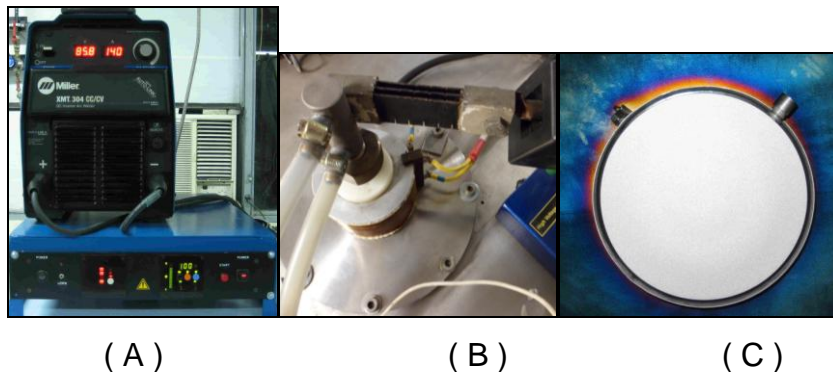
Los procesos PVD son aquellos en los cuales se realiza una deposición atomística para obtener directamente recubrimiento de ciertas especies sobre el sustrato. Dichas especies se evaporan y se depositan, es decir, no hacen reacciones químicas para sintetizar los recubrimientos como se realiza en los procesos químicos CVD. Por tal razón, este es un proceso que demanda menos temperatura que el CVD y es posible aplicarlo a materiales que no pueden estar expuestos a altas temperaturas. Dado que el transporte de las especies se realiza por medios físicos es necesario que el camino libre medio de los átomos y moléculas supere la distancia evaporador-sustrato o las dimensiones de la cámara de trabajo. Notemos que la ausencia de residuos de reacciones químicas ha estimulado el crecimiento de las técnicas de PVD, siendo hoy predominantes en algunas áreas como la de recubrimientos de nitruros y carbonitruros de titanio sobre aceros.

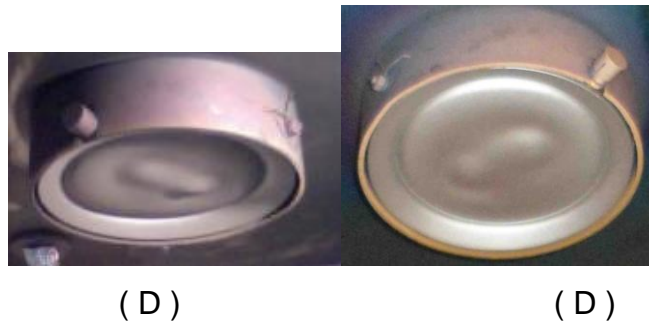
En el Laboratorio de Física y Tecnología del Plasma de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga) se implementa una tecnología de tratamiento de metales usando un vaporizador tipo descarga de arco y descarga pulsada de alto voltaje. Es importante que estas descargas puedan funcionar simultáneamente (régimen híbrido) y por separado. Tales posibilidades tecnológicas permiten estudiar tanto los efectos de implantación de iones en metales como los efectos producidos por películas delgadas protectoras fabricadas mediante la deposición reactiva en superficies metálicas. Este trabajo se enfoca en el funcionamiento del vaporizador de arco y se presentan algunos resultados acerca la dureza del acero SAE 1020 recubierto por películas de nitruro de titanio TiN_2 producidas bajo diferentes presiones del gas de nitrógeno.

6. CARACTERÍSTICAS DEL EVAPORADOR DE ARCO

El evaporador de arco está ubicado en el centro del techo de la cámara JUPITER, llamado actualmente MOSMET (Modificación Superficial de Metales) [9], ya que permite operar las descarga de arco eléctrico con alto voltaje a bajas presiones. El sistema de alimentación eléctrica producida, se realiza por medio de la adecuación de una fuente de alta corriente XMT 304 CC de la empresa Miller Electric Mfg Co. Una vez instalada, en el vaporizador de arco, se procedió a diseñar y fabricar un sistema de control electrónico que garantiza el funcionamiento de la descarga. Esta instalación fue realizada por el Doctor Petr Tsygankov (invitado por el Laboratorio de Plasma de la universidad de Bauman Rusia). El sistema de control asegura el funcionamiento de la descarga de arco en un régimen de pulsos con periodo variable, permitiendo cambiar el números de las nano-capas hasta 10.000 capas con grosores de 5 – 10 nanómetros por capa. La figura 1 muestra el conjunto completo del sistema de arco eléctrico, instalado en la cámara de descarga del reactor MOSMET.

Figura 1. (A) fuente de energía y panel de control del equipo de arco, (B) sistema magnético y de enfriamiento del evaporador, (C) cátodo (especies metálicas) en su estado inicial, (D) cátodo después de funcionamiento de la descarga durante 100 horas.



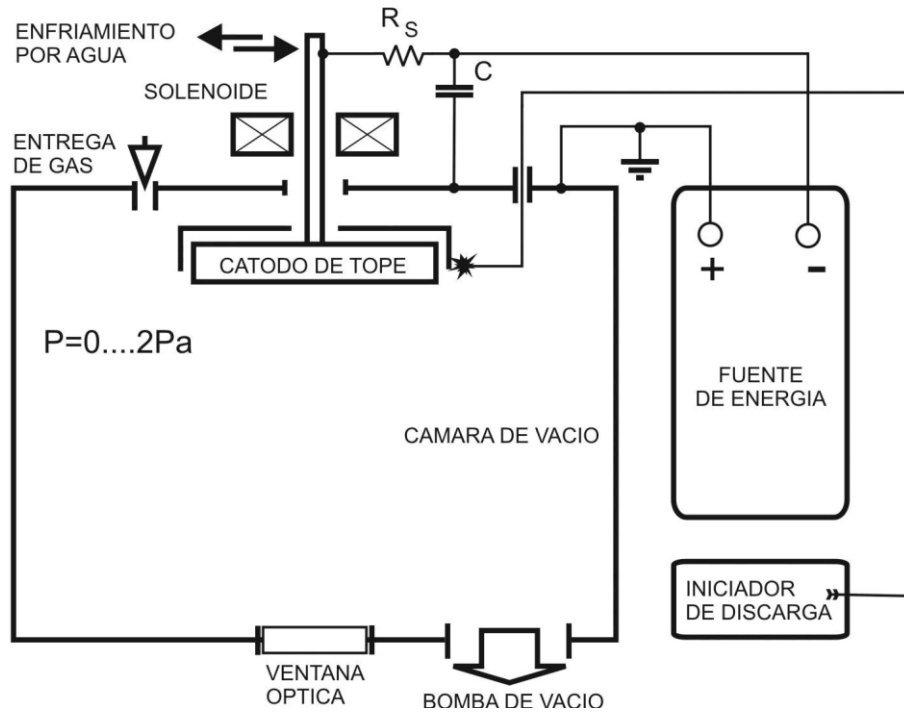


Las dimensiones de la cámara son $70 \times 80 \times 70 \text{ cm}^3$, como se muestra en Fig.2. La cámara se bombea por una bomba turbo-molecular de una productividad de 1500 l/s hasta una presión residual de 0.1 mPa. En la cámara se suministra suavemente un gas reactivo que en nuestro caso es el gas de nitrógeno mediante un controlador piezoeléctrico. En la Fig.2 se presenta un esquema general del equipo de arco. El cátodo está conectado con un generador de corriente mediante una resistencia de $10 \text{ m}\Omega$, que sirve para la medición de la corriente de descarga. Cerca de esta resistencia se localiza un condensador eléctrico que bloquea la influencia de la inductividad del cable de corriente. El generador con una característica voltio-empérica descendente, garantiza el funcionamiento estable del evaporador en el rango de corrientes 100-300 A bajo el voltaje 20-50 V.

La descarga se inicia con ayuda de un encendedor de chispa tipo plasma-erosión. Las muestras a tratar se colocan en una porta-muestra, colocado sobre la superficie plana del cátodo de alto voltaje. El cátodo del evaporador hecho de titanio de una pureza de 99.9%, es tipo disco de un diámetro de 178 mm y grosor inicial de 25 mm. Como se mencionó anteriormente la descarga de arco no se enciende por toda la superficie catódica sino está localizada solo en uno o algunos puntos que se llaman manchas brillantes (spot-catódico). Esta propiedad de evaporadores de arco exige que la mancha se mueva y evapore el material catódico de manera controlada. Por esta razón el evaporador fue equipado con un sistema de magnetos permanentes y alternos (solenoides) que forzarán la mancha de arco escanearse simultáneamente en las direcciones radial y acimutal que

garantiza un desgaste uniforme del material del cátodo. El cambio del campo magnético puede ser elegido por un operador en concordancia con las peculiaridades del funcionamiento del vaporizador con cierto material del cátodo y problemas tecnológicos o científicos a resolver.

Figura 2: Esquema principal del evaporizado de arco



Esquema de movimiento de la mancha

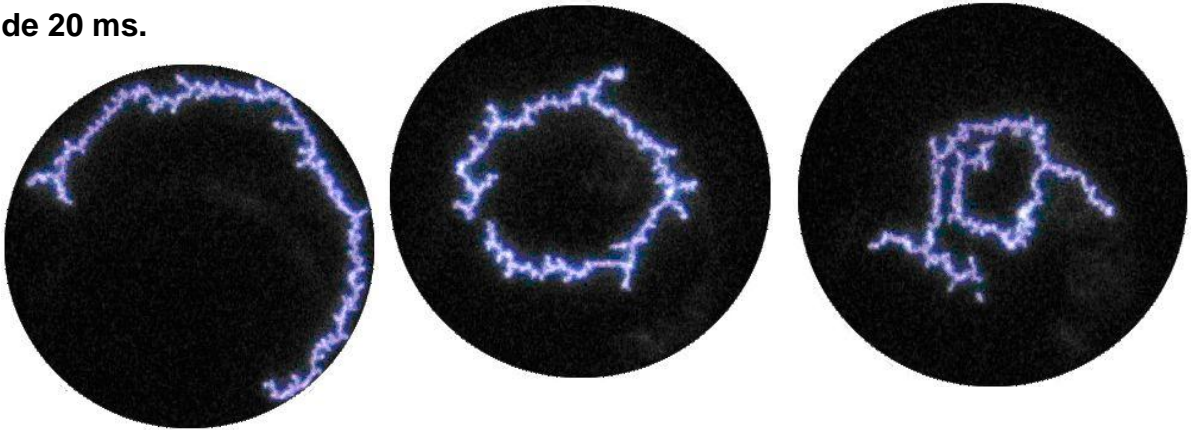
7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se mencionó anteriormente²⁴ a pesar que el vaporizador, sea suministrado por un generador d.c. de $20 - 25 V$, bajo una corriente de $100 - 300 A$. La descarga de arco que se genera gracias a la aparición y seguidamente de la destrucción térmica de centros de emisión de los electrones y de los vapores del material catódico²⁵. El tiempo de vida característico de estos centros es: $0.01 - 0.02 \mu s$ y sus dimensiones varían entre 0.01 y $1.0 \mu m$. Un resultado de la actividad de los centros de emisión es la erosión activa de la superficie catódica y la respectiva alimentación de la descarga por vapores del material del cátodo. En la superficie del cátodo se detectan simultáneamente centros de emisión que pueden ser un número contable, hasta algunas decenas de los mismos, localizados cerca uno a otro. Este conjunto estable de centros de emisión unidos se llama spot o mancha brillante que se visualiza fácilmente, pues sus dimensiones son de decenas partes de milímetro y sobre cada una de ellas se encuentra una nube de material vaporizado que emite intensamente en el rango visible y ultravioleta. Las manchas estables sobreviven más tiempo que los centros, habitualmente de $1 \mu s$ a $5 \mu s$. La figura 3 muestra las trayectorias visibles de las manchas controladas en la superficie catódica por el sistema magnético que fueron fotografiadas a través de la ventana ubicada en el piso de la cámara (ver Fig.2) con un intervalo temporal de $20 ms$.

²⁴ JUTTNER B. Cathode spots of electric arcs, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) pp.103.

²⁵ MESYATS, G.A., Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Nauka, Moscow, Russia, 2000.

Figura 3. Trayectorias de movimiento de manchas brillantes para intervalos de 20 ms.



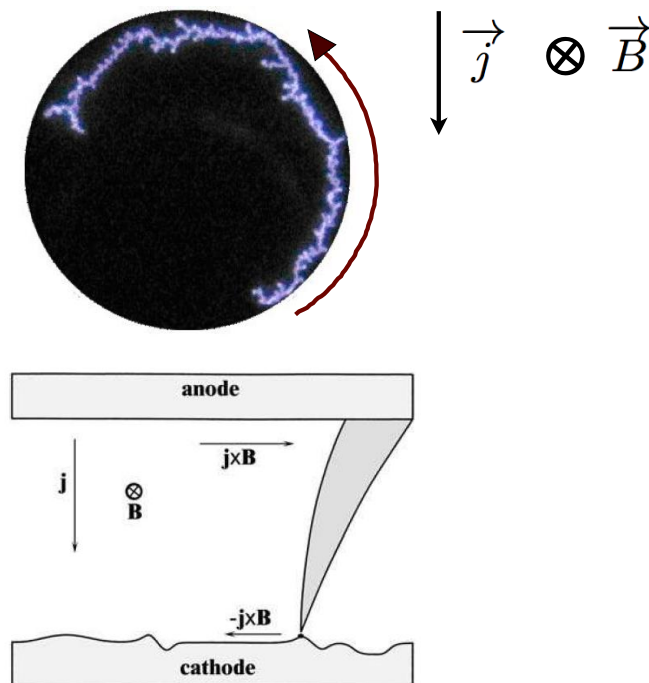
La velocidad de movimiento de la mancha de arco a una corriente de 100 A se estima alrededor de $25 - 40\text{ m/s}$ y este valor coincide muy bien con los datos reportados en la literatura²⁶. El sentido del movimiento de la mancha en cada instante se determina principalmente por la componente superficial del campo magnético \vec{B} . Debido a que los procesos térmicos son inerciales y el campo magnético por su esencia es vectorial, una nueva mancha aparece predominantemente cerca de la mancha que acaba de apagarse en otros puntos de la superficie del cátodo. Este efecto se ilustra en la fig 3 donde se puede ver que nuevas manchas aparecen en puntos ubicados no muy lejos de la trayectoria, y la misma trayectoria se forma por una serie de manchas nuevas que aparecen y de otras que se encuentran destruidas.

El proceso óptico es un proceso inercial, se percibe como un movimiento más o menos paulatino de una única mancha brillante sobre la superficie catódica. Esta situación conduce a un aumento de la velocidad visible de traslación de una mancha sobre el cátodo.

²⁶ BEILIS, I.I., "Theoretical modeling of cathode spot phenomena," in Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Boxman, R.L., Martin, P.J., and Sanders, D.M.,(Eds.). pp. 208–256, Noyes, Park Ridge, New Jersey, 1995.

Entonces en presencia del campo magnético el movimiento de la mancha se encuentra más o menos dirigida mostrando un fenómeno llamado movimiento retrogrado ya que las manchas se mueven en dirección opuesta a la dirección dada por la fuerza $\vec{j} \times \vec{B}$. Ver fig 4 En nuestro caso es la dirección de la componente superficial (que es la tangencial respecto a la superficie catódica) del campo magnético en referente a las fotografías en Fig.3 es a lo largo del radio del cátodo y la corriente está en contra del vector normal a la superficie que resulta que el sentido de la fuerza de Lorentz coincide con la dirección de las manecillas de reloj, pero como muestran las videograbaciones de las manchas brillantes sus movimientos se encuentran en la dirección opuesta (en contra de manecillas de reloj). Esta peculiaridad del movimiento fue observada reportada en²⁷ y actualmente es el objeto de investigación.

Figura 4. Trayectorias de movimiento de manchas brillantes



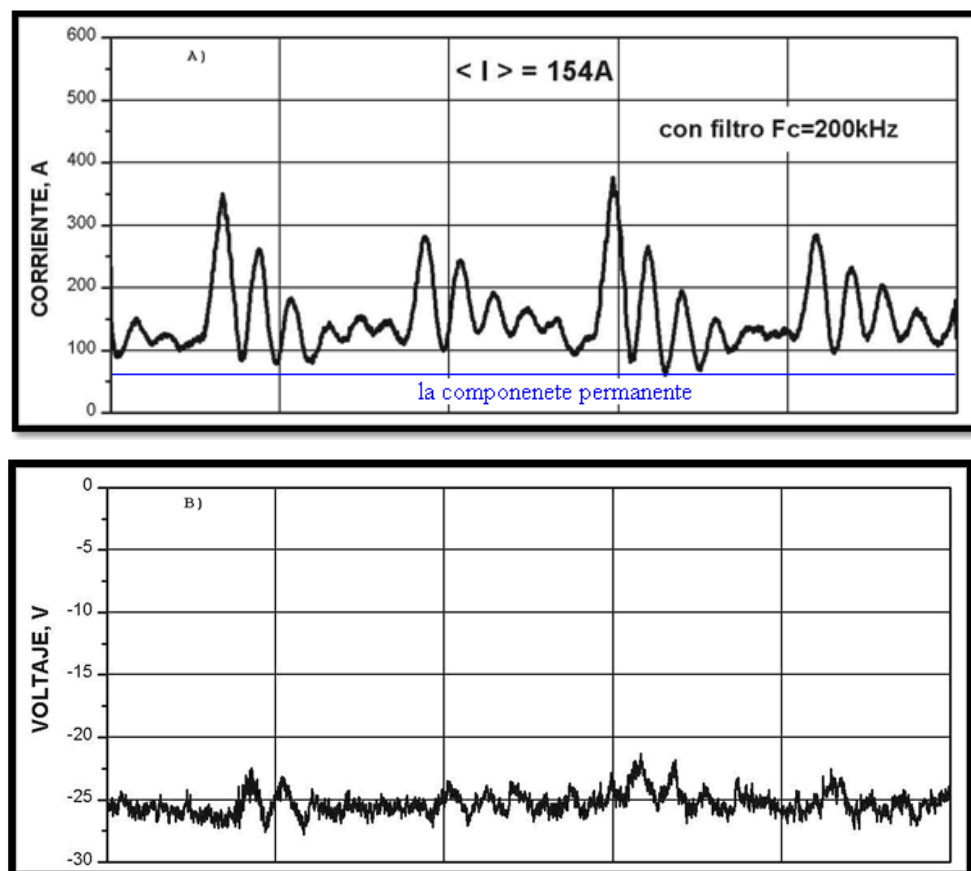
²⁷ MESYATS, G.A., Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Nauka, Moscow, Russia, 2000.

La mancha catódica tiene dos funciones básicas: suministra la descarga por emisión de material vaporizado para la continuidad de la corriente y la emisión de electrones desde el cátodo.

Es importante notar que para cada material catódico hay una corriente crítica con la cual se puede encender la descarga, y este encendido ocurre con solo un punto catódico²⁸.

A medida que se aumenta la corriente, se forman varias manchas brillantes que a su turno pueden agruparse o separarse. En Fig.5 se muestra las oscilogramas de

Figura 5. Oscilogramas de corriente de arco (arriba A) y del voltaje (abajo B).



²⁸ MESYATS, G.A., Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Nauka, Moscow, Russia, 2000.

la corriente (arriba) y del voltaje (abajo) de la descarga de un voltaje de 25 V y una corriente de 154 A obtenidas con un filtro que elimina las frecuencias mayores a **200 KHz**, para distinguir los procesos de baja frecuencia relacionados con la dinámica de las manchas catódicas. Las oscilaciones que se puede ver en el oscilograma de la corriente están enlazados con los grupos de manchas catódicas. Las frecuencias menores a **20 kHz** son componentes importantes en el funcionamiento del sistema, brindando una estabilización del arco. Una estimación de la corriente medida coincide con una precisión de algunos por cientos con la corriente media que proviene de la fuente de alimentación del vaporizador. En Fig.5 (A) se puede ver que además de la componente pulsada que es debido a la dinámica de formación y destrucción de las manchas hay una componente constante. Esta componente es provocada por los termoelectrones emitidos de los centros calentados debido a la alta inercia térmica al compararlo con el periodo temporal entre encendido de dos manchas sucesivas; es decir, los termoelectrones siguen siendo emitidos, después de que el arco ya traspasó a otra mancha. Si la corriente de descarga se disminuye hasta **80 A** que es la corriente mínima para funcionamiento estable de nuestro vaporizador, la componente constante se anula prácticamente. Entonces se puede afirmar que para el funcionamiento estable del arco en vacío además de la formación de las manchas catódicas es necesario tener un nivel significativo de la corriente de termoemisión.

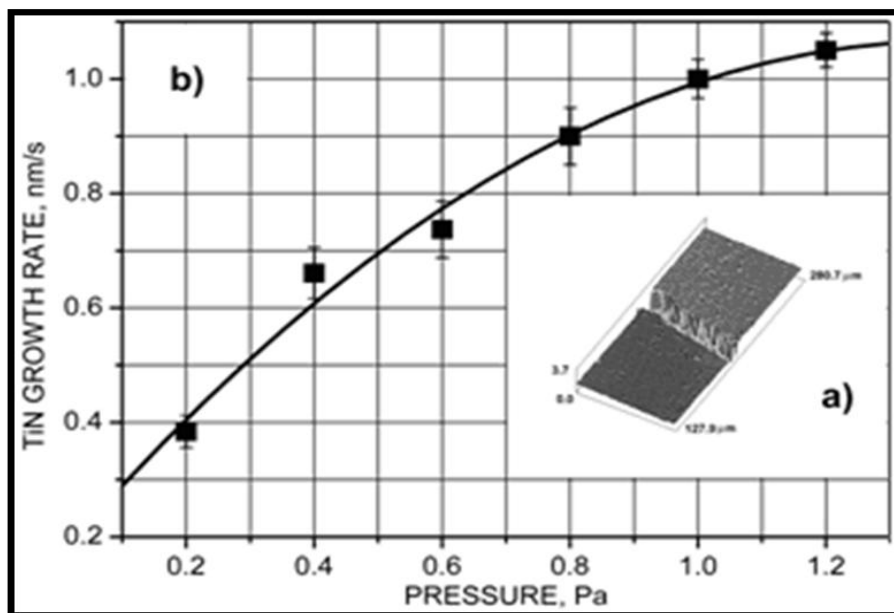
Una de las ventajas de los vaporizadores de arco ante otros tipos (por ejemplo, tipo magnetrón) consiste en que es previsto un denso flujo del vapor de material catódico a grandes distancias, hasta de 1 m del cátodo, que supone un tratamiento de superficies cuyos tamaños son inaccesibles para otras tecnologías.

Una de las propiedades importantes que caracteriza la calidad de los recubrimientos superficiales es la microdureza. En la primera serie de experimentos hemos elegido como sustrato un acero industrial que es el SAE

1020, sobre el cual se forma una película de nitruro de titanio TiN. Para fabricar tales películas la descarga de arco se enciende en un atmósfera de nitrógeno. La rapidez de la deposición reactiva de TiN depende de la presión de nitrógeno como se muestra en Fig.6. El grosor de las películas se determina por el método de escalón. Inicialmente se colocó un vidrio de baja rugosidad, una parte de este material se enmascara (el material se forro con papel aluminio) y la otra parte del material quedó expuesta a la deposición. Después del procedimiento de deposición, la altura se midió por medio de un microscopio con la técnica de interferometría óptica²⁹.

La imagen de un escalón se muestra en Fig.6. Los datos presentados en Fig.6 son obtenidos para el caso cuando la muestra se ubica a una distancia de 60 cm de la superficie del cátodo y a una temperatura menor de 300 °C.

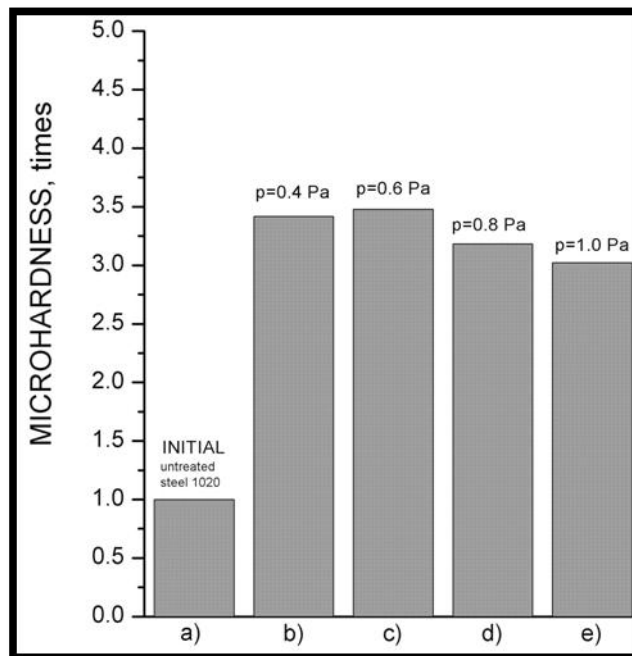
Figura 6. Velocidad de crecimiento de la capa TiN en dependencia de la presión de nitrógeno



²⁹ C.J. TAVARES, L. Rebouta, M. Andritschky, S. Ramos, Journal of Materials Processing Technology, 92-93.

En Fig.7 se presentan los datos comparativos de las micro durezas Vickers respecto a la microdureza del acero SAE 1020 no tratado (la columna a) y protegido por las capas TiN de un grosor de $2 \mu m$. Todas las muestras ante el procesamiento fueron sometidos a limpieza por descarga de argón. El equipo de micro dureza fue equipado con un penetrador de $10 g$. Las columnas de b) hasta e) muestran las micro durezas de las películas de TiN producidas en condiciones de las presiones de nitrógeno de $0,4 Pa$, $0,6 Pa$, $0,8 Pa$, y $1,0 Pa$ respectivamente. Se puede ver que la micro dureza alcanza su valor máximo cuando en el proceso de formación de la película en la cámara se mantiene a una presión de $0,6 Pa$. La micro dureza de la película TiN producida bajo la presión $0,6 Pa$ es 3,5 veces mayor que la microdureza del acero SAE 1020 no protegido.

Figura 7. Microdureza del acero SAE 1020 con películas de nitruro de titanio de una grosor de 2μ obtenidos bajo la presión de nitrógeno de 0.4-1.0 Pa.



8. ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL VAPORIZADOR DE VACIO

8.1 FUNCIONAMIENTO SIN CONTROL MAGNÉTICO

En el caso del funcionamiento sin control de arco, la mancha brillante se forma en un régimen esporádico en límites del radio de 8.5 cm (el diámetro del cátodo es 180 mm). La vaporización tiene lugar en condiciones de vacío con una presión residual de 10^{-3} Pa, es decir la transferencia del material del cátodo se realiza en un régimen sin colisiones. La dependencia de la intensidad de flujo de material vaporizado es cuadrática (la densidad de flujo es proporcional r^2). Las muestras fueron colocadas en diferentes distancias del cátodo y diferentes distancias del eje vertical del cátodo. El grosor de la película se mide por el método de escalón anteriormente mencionado. La velocidad de crecimiento de película se determina como $h=H/t$, donde t -tiempo de estancia de muestras bajo el flujo de titanio.

En la figura 8 se dan dependencias de velocidad (tasa) de crecimiento de película de la corriente de descarga. El volumen del material transferido (transportado) en unidad de tiempo se determina por $V = 2\pi \int_0^R r l dr$, R – radio de zona de vaporización

en el cátodo, l – profundidad media de la zona de vaporización. La tasa de erosión en el cátodo se determina como $M = \rho V$, donde $\rho = 4540 \text{ кг/м}^3$ es la densidad de titanio. En cálculos supongamos que la mayor parte del material catódico se transporta hacia el piso de la cámara. La eficacia de vaporización se determina como relación del material vaporizado a la carga transportada a través

de la superficie de cátodo: $m = \frac{M}{I}$, donde I – corriente de descarga. En la tabla 1

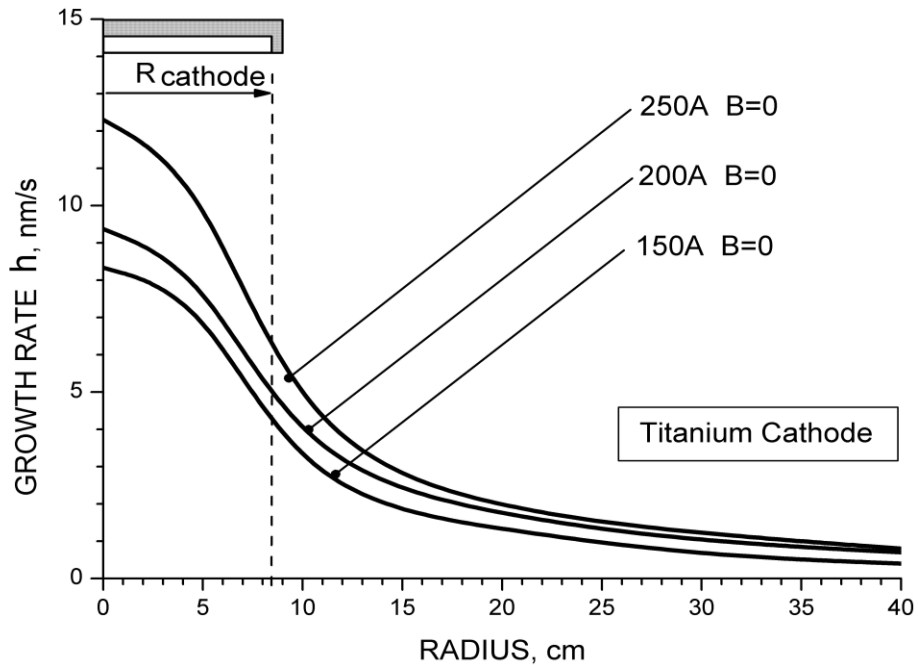
se dan los parámetros de vaporización para el caso donde no hay campo

magnético, que permita el manejo del movimiento de la mancha brillante sobre la superficie de cátodo.

Tabla 1. Parámetros de vaporización en ausencia de campo magnético

	I=150A	I=200A	I=250A
V, 10^{-10} m ³ /s	5,514	7,514	8,980
* M, 10^{-6} kg/s	2,50	3,41	4,11
* m, 10^{-5} g/C	1,67	1,70	1,64

Figura 8. Tasa de crecimiento de la película de titanio a lo largo del radio de la cámara para diferentes corrientes de descarga



En el caso de campo magnético, el campo tiene carácter radial sobre la superficie del cátodo y su magnitud es tal que garantiza que manchas brillantes se encuentran dentro de la zona con un radio interno de 5 cm y un radio externo de

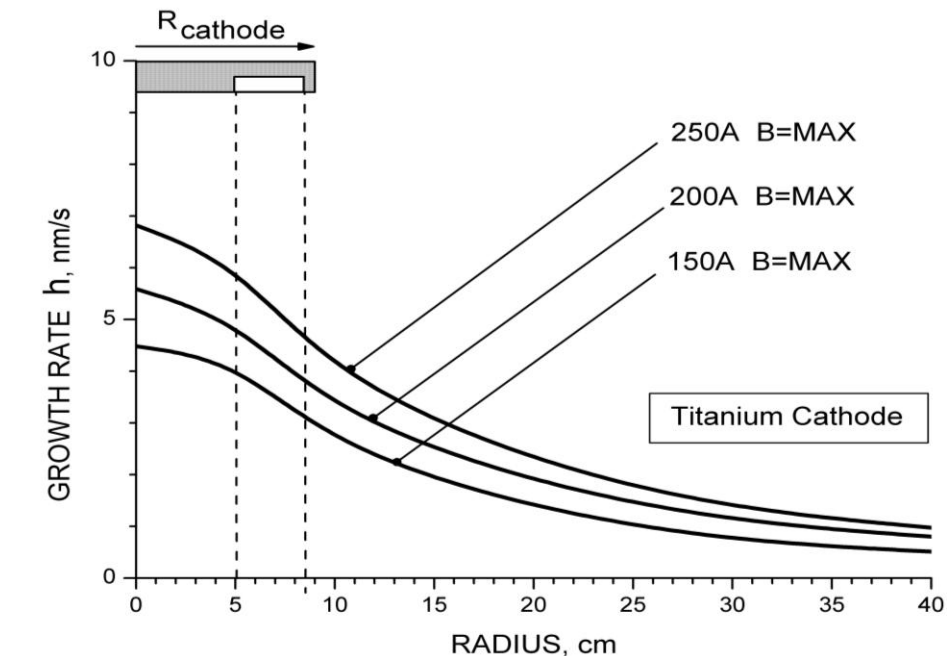
8.5 cm. El método de medición de parámetros de erosión es el mismo descrito anteriormente. Los parámetros se dan en la tabla 2.

Los perfiles de distribución del grosor de películas se dan en Fig.9. Bajo el campo magnético máximo (mediciones en distancia de 0.5 cm de la superficie da 0.005 T) la distribución se caracteriza por gradiente radial suficientemente menor que en ausencia del campo magnético. En este caso con el crecimiento de la corriente de descarga, la trayectoria de las machas brillantes se queda en límites del anillo que se controla por el campo magnético.

Tabla 2. Parámetros de vaporización en presencia de campo magnético

	I=150A	I=200A	I=250A
V, 10^{-10} m ³ /s	5,482	7,611	9,326
* M, 10^{-6} kg/s	2,49	3,46	4,23
* m, 10^{-5} g/C	1,66	1,73	1,69

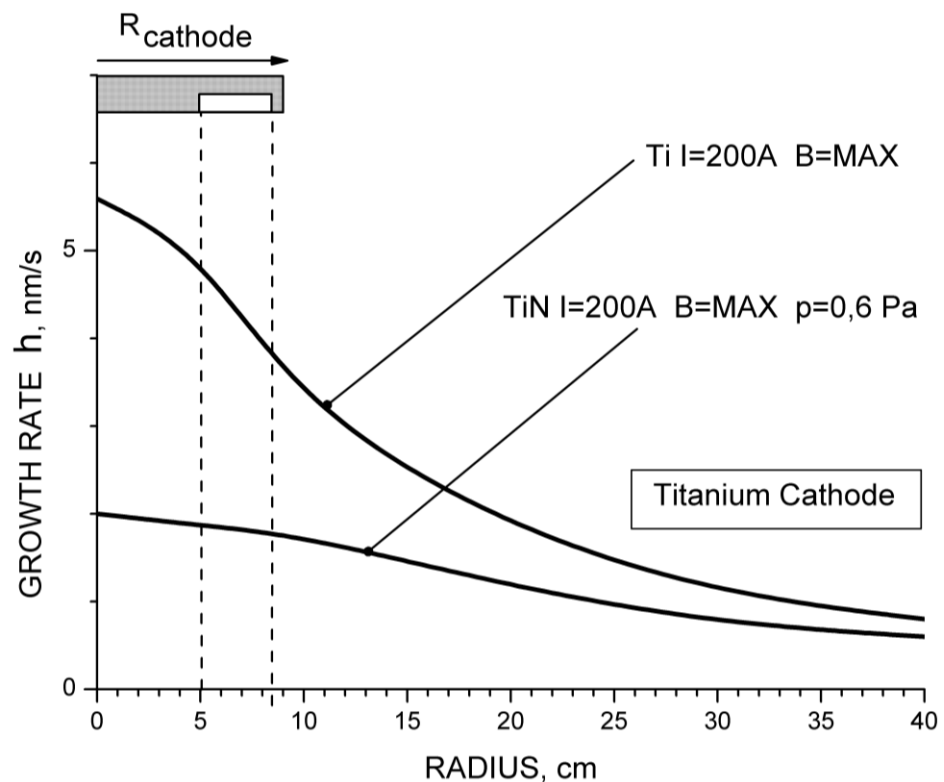
Fig. 9 Tasa de crecimiento de película de Ti en caso de campo magnético



8.2 PROCESO DE FORMACIÓN DE PELÍCULA DE NITRURO DE TITANIO

Cuando el vaporizador funciona con el campo magnético máximo bajo la corriente de descarga $I = 200$ A, con la presión de nitrógeno de 0.6 Pa. Bajo estas condiciones del nitrógeno, un átomo de titanio hace algunas colisiones con átomos de nitrógeno debido a que la longitud de la carrera libre es de 3-5 cm. En este régimen tiene lugar una redistribución del vapor de titanio en el volumen de la cámara que se ilustra en Fig.10. donde se puede visualizar que el grosor de películas se encuentra de mayor homogeneidad.

Figura 10. Distribución de grosor de la película de nitruro de titanio



CONCLUSIONES

Se logró obtener el funcionamiento conjunto de las descargas pulsada de arco eléctrico y de alto voltaje a bajas presiones destinadas para el tratamiento superficial de especies metálicas en materiales expuestos en medios agresivos, dejando pendiente el estudio espectroscópico de la descarga de arco ya que en este proceso aparecen especies como Ti I y Ti II los cuales son objeto de estudio actualmente en el laboratorio de física del plasma en la Universidad Industrial de Santander y en otros grupos de investigación.

Se estudia y se analiza la estructura de la descarga de arco tipo arco catódico. Se muestra que la corriente de arco es determinada por emisión de electrones en explosiones de micro picos, en la estructura superficial de las muestras a tratar y de la termo emisión inercial que se observa durante los periodos entre encendido de dos manchas seguidas.

Se estudia el funcionamiento de una descarga de arco con un sistema de control de movimiento de las manchas brillantes de arco sobre la superficie del cátodo

Se muestra que las manchas brillantes participan simultáneamente en el movimiento radial y acimantal, colaborando así a un desgaste uniforme del material del cátodo

Se verificó que el movimiento de manchas brillantes no se somete a la ley de Lorentz que actualmente queda sin explicaciones correctas.

Los experimentos dedicados a mediciones de la dureza del acero AISI1020 cubiertos de películas de TiN muestran que la dureza de la película protectora de nitruro de titanio aumenta la microdureza del acero SAE 1020 a 3,5 veces mayor

que la dureza de la superficie del acero sin tratamiento, y que depende de la densidad de nitrógeno en la cámara de tratamiento. Supongamos que la dependencia de la dureza de la película es debido al cambio de presión N_2 , que influye a la estructura cristalina de películas de TiN_2 . Para esclarecer esta dependencia es necesario estudiar sistemáticamente las estructuras cristalinas de películas obtenidos en diferentes condiciones.

Se logra evidenciar que la velocidad de crecimiento de las películas en ausencia de campo magnético y la distribución radial de la película es significativamente no homogénea; para lo cual es necesario usar un sistema de movimiento de la muestra para la formación de películas de un grosor determinado. Lo cual nos muestra que en el régimen de vaporización con el campo magnético, se caracteriza por una mayor homogeneidad de flujos del material vaporizado. Además se establece que la tasa efectiva de vaporización no depende de la corriente de descarga y es de $1,69 \cdot 10^{-5}$ g/C que es cercana a la eficacia sin campo magnético que es $1,67 \cdot 10^{-5}$ g/C.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERS A. A., Brief Modern History of Cathodic Arc Coating en 50 Years of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters, chapter 16, ed. by Donald M. Mattox and Vivienne Harwood Mattox, Society of Vacuum Coaters, 2007.

BEILIS, I.I., "Theoretical modeling of cathode spot phenomena," in Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, Boxman, R.L., Martin, P.J., and Sanders, D.M.,(Eds.). Noyes, Park Ridge, New Jersey, 1995.

C.J. TAVARES, L. REBOUTA, M. ANDRITSCHKY, S. RAMOS, Journal of Materials Processing Technology.

G. A. MESYATS "The role of fast processes in vacuum breakdown," in Proc.10th Int. Conf. on Phenomena in Ionized gases, Oxford, U.K, 1971.

HANTZSCHE E., Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance. IEEE Trans. On Plasma Sci., 2003.

I.G KEASEV, Cathode Processes of Electric Arcs. Moscow, U.S.S.R.

JUTTNER B. Cathode spots of electric arcs, J. Phys. D: Appl. Phys, 2001.

KESAEV I. G. Cathode Processes in Electric Arcs. Moscow, 1968: Nauka.

MESYATS G.A. Properties of ectons in a vacuum discharge. Proc. XVI Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Moscow-St. Petersburg), 1994, ed. by G A Mesyats (Washington, DC: SPIE).

MESYATS, G.A. and Proskurovsky, D.I., Pulsed Electrical Discharge in Vacuum. Springer-Verlag, Berlin, (1989). Mesyats, G.A., Explosive Electron Emission. URO Press, Ekaterinburg, 1998.

MESYATS, G.A., Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Nauka, Moscow, Russia, 2000.

MESYATS, G.A., Ecton or electron avalanche from metal, Sov. Phys. Usp. 38, 567–590, 1995.

NOUVELLESTENDANCES EN PROCÉDÉS MAGNETRON ET ARC POUR LE DÉPÔT DE COUCHES MINCES” A joint workshop of the Belgian and French Vacuum Society Gent, Belgium, November 24-25, 2003, Cathodic Arcs André Anders.

SERGEY A. BARENGOLTS, GENNADY A. MESYATS, AND DMITRY LEONIDOVICHSHMELEV. Structure and Time Behavior of Vacuum Arc Cathode Spots, IEEE transactions on plasma science, vol. 31, No. 5, October 2003.